

ривным наблюдением дозиметриста. Этот метод широко используется практически во всех странах. Поэтому в настоящее время много внимания уделяется разработке специальных пневмокостюмов и других средств индивидуальной защиты. Опыт Советского Союза в этой области нашел свое отражение в двух докладах, представленных С. М. Городинским («Дезактивация защитного оборудования и средств индивидуальной защиты») и «Средства индивидуальной защиты для работы в горячих лабораториях»). Во Франции раз-

работан пневмокостюм весьма оригинальной конструкции, позволяющей оператору входить в герметизированное помещение без нарушения герметичности. Здесь использован тот же принцип, что и в системе «двойной крышки» (Ж. Вергю, Франция). Костюмы такой конструкции применяются также в ФРГ (Х. Виттэ и др.).

Полные тексты всех представленных докладов и обобщений будут опубликованы МАГАТЭ в виде трудов симпозиума в 1970 г.

В. И. КОСЯКОВ

## Международная конференция по удержанию плазмы в замкнутых системах

С 29 сентября по 3 октября 1969 г. в Дубне проходила Международная конференция по удержанию плазмы в замкнутых системах, организованная Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР и Академией наук СССР. Интерес к этому, казалось бы частному вопросу всей проблемы термоядерных исследований, обусловлен, во-первых, значительными успехами в получении и удержании относительно горячей плазмы в тороидальных системах и, во-вторых, перспективностью использования подобных систем для создания в будущем энергетически выгодного термоядерного реактора.

В работе конференции участвовало 200 специалистов. Было представлено и заслушано 65 оригинальных работ и 6 обзоров, посвященных анализу результатов, полученных на тороидальных системах различных типов, и последним достижениям теории.

Восемь заседаний были тематическими. Так, первые два заседания конференции были посвящены стеллараторам, третье заседание — левитрону и его разновидностям (сфератор, мультиполи), четвертое — проблемам удержания плазмы в замкнутых системах, пятое — токамакам, на шестом рассматривались вопросы теории устойчивости и процессов переноса плазмы в тороидальных системах, седьмое заседание было посвящено различным методам нагрева плазмы и восьмое — тороидальному  $\theta$ -пинчу и удержанию плазмы с помощью высокочастотных полей. На заключительном заседании были заслушаны сообщения об итогах проходившей в сентябре 1969 г. в Калеме (Великобритания) конференции по инженерным проблемам термоядерного синтеза и обзоры акад. Л. А. Арцимовича по экспериментальным работам, представленным на конференцию. Кроме того, в процессе работы конференции происходили неофициальные дискуссии по многим вопросам и, в частности, по стеллараторам и токамакам.

В этой небольшой заметке не представляется возможным дать подробный анализ работ, доложенных на конференции. Поэтому мы проанализируем состояние вопроса по удержанию плазмы в трех типах систем: стеллараторах, токамаках и мультиполях.

Изучение удержания плазмы в стеллараторах интенсивно проводится в СССР, США, Великобритании и ФРГ. На конференции были представлены работы, выполненные на всех действующих установках этого типа. За время, прошедшее с Новосибирской конференции 1968 г., в СССР были введены в строй стеллараторы «Тор-1» и «Тор-2» в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР и «Ураган» — в Харьковском физико-техническом институте. На стеллараторе «Ураган» удалось достигнуть условий, которые должны

заметно уменьшить роль неустойчивостей в диффузии плазмы — величина «перекрещенности» силовых линий, так называемый шир, достигает величины  $\approx 0,1$ .

Изучение удержания проводилось на установках, отличавшихся друг от друга мультипольностью винтовых полей, геометрическими размерами и величинами напряженности магнитного поля. Кроме того, параметры плазмы также отличались весьма существенно. В качестве ярких примеров можно указать, что в стеллараторе W-II (ФРГ) температура ионов и электронов составляет  $\approx 0,2$  эв и плотность  $10^8 - 10^9$  см<sup>-3</sup>, в то время как в стеллараторе «Ураган»  $T_e \approx 25 \div 100$  эв при плотности плазмы  $10^{12} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Во всех других экспериментах температуры заряженных частиц и их плотности имели промежуточные значения.

Однако, несмотря на такое сильное различие параметров плазмы и установок, методов создания плазмы и ее нагрева, во всех, или, по крайней мере, в большинстве экспериментов можно отметить общие закономерности.

Превзойдено так называемое бомовское время, которое в течение многих лет считалось пределом времени удержания плазмы в стеллараторах. Начало этому положили работы по удержанию слабостолкновительной плазмы, выполненные в 1965 г. на стеллараторе «Ливень-1» в ФИАНе. Переход к изучению слабостолкновительной плазмы и на других стеллараторах подтвердил эти результаты и позволил добиться удержания плазмы в течение 10—20 бомовских времен, как это было показано в экспериментах, выполненных на установках «Тор-1» (ФИАН, Москва) и Прото-Клео (Калем, Великобритания). Заметим, что гипотетический термоядерный реактор должен работать в режиме «редких» столкновений и поэтому изучение удержания такой плазмы является, в определенной степени, моделированием термоядерной плазмы.

Второй общей закономерностью является увеличение наблюдаемого времени  $\tau$  удержания плазмы с ростом угла  $i$  вращательного преобразования силовых линий. Наличие такой зависимости имеет первостепенное значение, ибо указывает на возможность дальнейшего повышения времени удержания плазмы. Вместе с тем эта связь времени удержания и угла вращательного преобразования позволяет, с определенной степенью достоверности, интерпретировать эксперименты в рамках современной теории диффузии в тороидальных системах. Выполненные в последние годы работы по расчетам коэффициентов переноса, обусловленных парными столкновениями, указывают, что в тороидальных системах скорость диффузии частиц во много раз выше, чем в системах с однородным магнитным полем, и что при определенных частотах соударений возникает

есяма сильная зависимость этой скорости от угла вращательного преобразования силовых линий. Согласно проведенным оценкам, условия по частотам соударений для экспериментов, в которых наблюдается пропорциональность зависимости  $\tau$  от  $i$ , удовлетворяют критериям теории.

Коллессионное согласие теоретических и экспериментальных значений времен удержания в настоящее время еще не получено, хотя во многих случаях эти значения отличаются в 10—30 раз. Однако сейчас трудно было бы ожидать более строгого согласия как из-за отсутствия достаточно полных сведений об условиях эксперимента, так и из-за приближений, принятых при получении теоретических зависимостей. Можно надеяться, что дальнейшее развитие теории и эксперимента приведет к большему пониманию процессов диффузии и укажет пути увеличения времени жизни частиц и энергии.

В отличие от стеллараторов, исследования удержания плазмы в токамаках до настоящего времени проводятся только в Советском Союзе. В работах по исследованию термоизоляции плазмы в этих установках, представленных Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова, были доложены новые результаты по изучению нагрева ионов, аномального сопротивления гидромагнитной структуры шнура. В совместном англо-советском эксперименте по томсоновскому рассеянию лазерного луча на плазме получены дополнительные данные об электронной температуре и концентрации плазмы в токамаке.

Исследования нагрева ионов при относительно высоких концентрациях (более  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>) показывают, что в этих условиях наблюдаемые эффекты могут быть объяснены классическими механизмами нагрева ионов. На установке «Токамак-3» (Т-3) температура ионов дейтерия достигала 400 эв. В этих экспериментах наблюдалось излучение нейтронов из плазменного шнура, причем интенсивность нейтронного излучения соответствовала измеренной температуре дейтонов.

В модельных экспериментах на ЭВМ по исследованию баланса энергии в установках токамак при учете только классической ионной теплопроводности и кулоновского механизма нагрева ионов вычисленная величина температуры ионов не более чем в 1,5 раза превышала экспериментальное значение.

Опыты по определению энергетического спектра электронов в плазме на установке Т-3 методом томсоновского рассеяния показали, что распределение электронов близко к максвелловскому, их температура лежит в пределах от 600 до 1000 эв, что согласуется с результатами диамагнитных измерений, выполненных ранее. Концентрация электронов, обладающих этой температурой, составляет  $1,5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Такая же величина была получена при измерениях плотности с помощью радионтерферометра. Из этих измерений следует, что объяснение большого времени удержания в токамаках, основанное на предположении о существовании двух электронных температур — низкой (ею обладает основная масса электронов и ей соответствует большое боровское время жизни) и высокой (ею обладает малая доля электронов) — оказывается неверным.

Изучение процессов переноса в токамаке показывает, что в редкой (меньше  $1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) и плотной (выше  $1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) плазмах эти процессы резко различаются. В области малых частот столкновений (плазма малой плотности) наблюдается аномальное сопротивление и коэффициенты переноса оказываются значительно выше классических. При высокой концентрации плазмы

наблюдаемый коэффициент теплопроводности оказывается близким к классическому. Однако пока из этих экспериментов рано делать вывод о том, что при больших концентрациях потери плазмы в токамаке определяются только парными столкновениями. Необходимо дальнейшие детальные исследования и, в первую очередь, переход от интегральных измерений к локальным измерениям параметров плазменного шнура.

Следует отметить, что в смысле технического выполнения токамак оказался простейшей системой, поэтому к настоящему времени на нем получены наиболее ясные физические результаты. Однако проведенные эксперименты не дают ответа на основной вопрос — каковы механизмы переноса энергии плазмы из плазменного шнура. Ответ на этот вопрос могут дать дальнейшие исследования на различных тороидальных установках.

Последние результаты, полученные на токамаках (высокие температуры заряженных частиц и нейтроны термоядерного происхождения), привели к тому, что существовавшее долгое время за рубежом скептическое отношение к такому методу термоизоляции и нагрева плазмы резко изменилось. Свидетельством этого являются доложенные на конференции проекты тороидальных систем типа токамак «Ормак» (Ок-Ридж, США) и «Алкатор» (МИТ, США), сооружение которых начато в 1969 г. и начало экспериментов планируется на 1970 г.

Наконец, последний вопрос, на котором представляется целесообразным остановиться в настоящем обзоре, — это исследования, выполненные на левитронах, сфераторе и мультиполах.

Изучение свойств этих систем проводится в основном в лабораториях США, Японии и СССР. Уже на Новосибирской конференции 1968 г. было показано, что в мультипольных системах время удержания плазмы заметно превышает боровское, но все же достаточно мало. Были выдвинуты предположения о причинах, приводящих к высокой скорости диффузии частиц. В качестве одной из наиболее вероятных причин было признано присутствие подвесов в кольцевых проводниках, создающих магнитное поле. Применение левитирующих токовых колец позволило бы устранить поддержки и таким образом однозначно сделать суждение об их роли. Сейчас в США весьма интенсивно и успешно ведутся исследования по созданию сверхпроводящих левитирующих колец, однако в работах, представленных на настоящую конференцию, левитация еще не использовалась.

Расчеты и эксперименты, проведенные на сфераторе (Принстон, США) и тороидальном окуполе (Висконсин, США), несмотря на то, что в них наблюдалось удержание плазмы более чем в течение ста боровских времен, еще раз показали фатальную роль поддержек в уходе плазмы. Как выяснилось, влияние поддержек заключается не только в их непрозрачности для частиц и потерях последних вследствие конечных размеров опор, но, главным образом, из-за искажения траекторий заряженных частиц вследствие электрических полей, возникающих вблизи поддержек. Область возмущенного пространства существенно больше геометрических размеров сечения опор, и поэтому изменение этих размеров не дает существенного эффекта.

Как представляется сейчас, мультипольные системы, в отличие от токамаков и стеллараторов, не могут претендовать на роль гипотетического реактора. Это связано с тем, что в настоящее время не видно путей обеспечения сверхпроводящего состояния левитирующих колец в течение достаточно длительного времени в условиях высокой плотности энерговыделения.

Поэтому эти исследования носят в определенной степени академический характер и преследуют своей целью выяснение ряда закономерностей процессов диффузии. Тем не менее предполагаемое сейчас отсутствие перспектив прикладного характера не делает эти эксперименты менее ценными. В этой связи уместно отметить сооружаемую сейчас фирмой «Галф дженерал атомикс» (Сан-Диего, США) гигантскую тороидальную мультипольную ловушку. Объем вакуумной камеры превышает  $40 \text{ м}^3$ , расстояние между кольцевыми проводниками 1 м, а их диаметр 2-3 м. Напряженность магнитного поля в средней плотности системы несколько сот гаусс.

Сооружение установки, которое должно закончиться в 1970 г., свидетельствует о том, что не все относится скептически к потенциальным возможностям подобных систем.

Определенный интерес вызвали теоретические рабо-

ты по стабилизации низкочастотных колебаний различными системами обратных связей.

Как из выступлений акад. Арцимовича и д-ра Розенблюта, подводивших итоги конференции, так и из бесед со многими ее участниками следует, что наблюдается значительный прогресс в понимании физических процессов, происходящих при нагреве и удержании плазмы в тороидальных системах. Наблюдается сближение эксперимента и теории, теоретики практически перестали «угрожать» новыми неустойчивостями, а экспериментаторы все чаще и чаще приходят к мнению, что не только турбулентные процессы ответственны за высокие коэффициенты теплопроводности диффузии плазмы. Все это создает, если не радужные надежды, то, во всяком случае, определенный оптимизм в быстром достижении физической термоядерной реакции, оптимизм, основанный на первых достижениях, полученных сейчас на токамаках.

В. С. СТРЕЛКОВ, И. С. ШПИГЕЛЬ

## Выбросы радиоактивных благородных газов с установок по регенерации ядерного горючего

Целью совещания экспертов, состоявшегося в Париже в октябре 1969 г., было дать рекомендации МАГАТЭ по его дальнейшей деятельности в области контроля за выбросами радиоактивных благородных газов в расширяющейся промышленности регенерации ядерного горючего. В совещании экспертов приняли участие 16 ученых из Великобритании, Италии, Нидерландов, СССР, США, Франции, ФРГ, Швеции и Японии. Доклады и дискуссии были посвящены прогнозированию возможного количества выбросов радиоактивных благородных газов, их распространению в атмосфере, прогнозированию тканевых доз при внешнем и внутреннем облучении, создаваемых радиоактивными изотопами ксенона и криптона. На совещании заслушаны доклады, касающиеся проблемы современной технологии отделения благородных газов от прочих газообразных выбросов с предприятий. В процессе дискуссии основное внимание было уделено эффектам выбросов в будущем. При существующих циклах переработки, когда время выдержки облученного топлива равно 150 дням, единственным радиоактивным изотопом благородных газов, имеющим значение с точки зрения радиационной опасности при выбросах в атмосферу, является криптон-85. Именно поэтому криптому-85 было уделено основное внимание. Вследствие того что радиоактивные изотопы ксенона имеют короткие периоды полураспада при выбросах в атмосферу на ядерных реакторах, они могут создавать проблему лишь только местного характера. Исходя из предположения, что мировая мощность ядерных энергетических установок к 2000 г. достигнет уровня  $2 \cdot 10^6 \text{ Мвт}$ , была оценена доза, которая будет создаваться криптоном-85. При достижении указанной мощности ядерных установок концентрация криптона-85 в атмосферном воздухе достигнет примерно  $1 \text{ мкюри/г}$  криптона или примерно  $4 \cdot 10^{-12} \text{ юри/л}$  воздуха. При такой концентрации доза

от глобального криптона-85 будет равняться нескольким миллирадам в год на кожу и нескольким сотым миллирада на гонады и другие внутренние органы и ткани, что меньше дозы, создаваемой нормальным естественным фоном ( $100 \text{ мрад/год}$  на уровне моря), в десятки и тысячи раз соответственно. Что касается локальных проблем, то дозы от благородных радиоактивных газов в непосредственной близости от предприятий по регенерации горючего будут в общем низкими. Однако если в районе с неблагоприятными метеорологическими условиями будет функционировать крупное предприятие мощностью порядка  $100\,000 \text{ Мвт}$ , то это может вызвать определенное осложнение. Устранение подобных осложнений местного характера может быть достигнуто увеличением высоты трубы или путем улавливания радиоактивных благородных газов. Для улавливания ксенона и криптона в настоящее время имеется достаточное количество способов. Как отмечено в дискуссии, наиболее приемлемыми способами улавливания являются сорбция благородных газов активированным углем, силикагелем и молекулярными ситами, криогенная дистилляция, экстракция, а также применение мембран с селективной проницаемостью.

Таким образом, до 2000 г. не ожидается возникновения проблемы на национальном или международном уровне в связи с выбросом благородных газов с предприятий по регенерации горючего. Все основные предприятия по регенерации горючего должны иметь установки для удаления благородных газов из общего количества отработанных газов, рассчитанные на ввод в действие в следующем веке. Уже в конце этого века следует разработать международные соглашения по ограничению выбросов благородных газов.

А. Д. ТУРКИН